

# Neue Möglichkeiten für die Prüfung von auf Wanderwellen beruhenden Fehlerortungsfunktionen im Feld

**Autoren:** Christopher Pritchard, Heinz Lampl, Thomas Hensler, OMICRON electronics GmbH  
[christopher.pritchard@omicronenergy.com](mailto:christopher.pritchard@omicronenergy.com), [heinz.lampl@omicronenergy.com](mailto:heinz.lampl@omicronenergy.com),  
[thomas.hensler@omicronenergy.com](mailto:thomas.hensler@omicronenergy.com)  
Österreich

## Zusammenfassung

Die Fehlerortung mittels Wanderwellen hat sich als genaues und zuverlässiges Verfahren für die präzise Lokalisierung von Fehlern auf langen Übertragungsleitungen bewährt. Dieses Verfahren findet sich sowohl in modernen Leitungsschutzrelais als auch in separaten Fehlerortungsgeräten und liefert nützliche Informationen für das Bedien- und Technikpersonal. Die Prüfung und Verifizierung der korrekten Funktion dieser Geräte stellt eine große Herausforderung dar und wird daher bei der Inbetriebnahme meist nicht durchgeführt. Während dies für reine Fehlerortungsgeräte vielleicht noch akzeptiert werden kann, wird die Funktionsprüfung bzw. Verifizierung für neue Schutzrelais-Generationen zum Muss werden, da bei solchen Geräten die Ermittlung von Fehlern und der entsprechenden Auslösereaktionen auf der Basis von Wanderwellen erfolgen wird.

Ein neues Prüfkonzept ermöglicht es nun, solche Prüfungen auch mit herkömmlichen Schutzprüfgeräten im Feld durchzuführen. Dabei werden den für die Schutzprüfung verwendeten herkömmlichen Signalen, welche eine niedrige Frequenz und hohe Stromwerte aufweisen, die Wanderwellenimpulse überlagert. Die Einspeisung der Spannungen und Ströme an den beiden Leitungsenden wird mittels auf beiden Seiten positionierten GPS-gesteuerten Zeitreferenzen hochpräzise zeitsynchronisiert. Durch eine auf einem PC laufende Steuersoftware können für jede beliebige Stelle auf der Leitung Fehler simuliert und das zugehörige Verhalten der Schutzelemente und der Fehlerortung überwacht und beurteilt werden. Das Dokument bietet außerdem einen Ausblick auf die Herausforderungen bei der Prüfung von Relais, deren Auslösesteuerung auf einer komplexen Analyse von Wanderwellen basiert.

**Schlagwörter:** Wanderwelle, Fehlerortung, Schutzrelais, Schutzprüfung, End-to-End-Prüfung

## Einleitung

Das Prinzip von Wanderwellen auf Übertragungsleitungen ist in der Energietechnik seit Jahrzehnten wohlbekannt. Dennoch nutzen die meisten aktuellen digitalen Schutzgeräte für ihre Schutzfunktionen und die Fehlerortung auch heute noch Elemente, die mit der Vektoranalyse arbeiten, und auf Vektorgrößen und Impedanzen basierende Algorithmen. Dies ist mit der Technik elektromechanischer Geräte in der Vergangenheit vergleichbar. Die Fortschritte in der Signalverarbeitung und die Rechengeschwindigkeiten digitaler Relais eröffnen jedoch neue Möglichkeiten bei der Nutzung von Algorithmen für die Analyse im Zeitbereich. In Verbindung mit einer präzisen Zeitsynchronisation von im gesamten Netz verteilten Geräten ermöglicht dies eine viel genauere und weitaus schnellere Fehlerortung und somit eine erheblich schnellere Schutzreaktion.

Für den Schutzingenieur erwachsen hieraus neue Anforderungen, da er solche neuartigen Geräte im Feld in Betrieb nehmen und deren korrekte Funktion sicherstellen muss. Eine Prüfung von im Zeitbereich arbeitenden Relaiselementen, wozu mit Wanderwellen arbeitende Elemente zählen, ist durch herkömmliche Prüfungen mit einer Einspeisung von statischen Vektoren für die Spannungen und Ströme nicht möglich.

Zusätzlich muss für Schutzsysteme, die mit präzisen zeitsynchronisierten Informationen von mehreren Enden arbeiten, die Inbetriebnahmeprüfung im Feld in der Lage sein, derartige Ereignisse mit zeitsynchronisierten Schutzprüfgeräten zu simulieren oder zu reproduzieren. Dabei muss bei der Zeitsynchronisierung mit einer Genauigkeit gearbeitet werden, die mindestens der Genauigkeit der zu prüfenden Geräte entspricht.

## Grundlagen zu Wanderwellen

Ein zu einem beliebigen Zeitpunkt außer dem Nulldurchgang der Spannung auftretender Fehler auf einer Leitung erzeugt eine Wanderwelle, die sich vom Fehlerort aus mit einer Geschwindigkeit nahe der Lichtgeschwindigkeit zu den beiden Leitungsenden hin ausbreitet. Abbildung 1 zeigt das Prinzip anhand eines Fehlers auf einer einfachen Übertragungsleitung.



Abbildung 1: Prinzip der Ausbreitung von Wanderwellen

Wanderwellen können anhand des linearen Differenzialgleichungssystems für Übertragungsleitungen (Telegrafengleichungen) ermittelt werden. Für eine verlustlose Übertragungsleitung beschreibt das nachfolgende Paar von gekoppelten partiellen Differenzialgleichungen erster Ordnung die Spannungen  $v(x, t)$  und Ströme  $i(x, t)$  auf der Leitung:

$$\frac{\partial v(x, t)}{\partial x} = -L' \frac{\partial i(x, t)}{\partial t}$$

$$\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = -C' \frac{\partial v(x, t)}{\partial t}$$

Dabei ist  $L'$  die relative Induktivität der Leitung in pu (per unit) und  $C'$  die relative Kapazität in pu. Dies kann wie folgt in die Wellengleichungen (d'Alembert-Gleichungen) eingesetzt werden:

$$\frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2} = L' C' \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial t^2} = L' C' \frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial x^2}$$

Die allgemeine Lösung der Wellengleichungen kann als Summe (Überlagerung) einer Wanderwelle  $f$  in Vorwärtsrichtung und  $g$  in Rückwärtsrichtung ausgedrückt werden:

$$v(x, t) = f(x - ct) + g(x + ct)$$

$$i(x, t) = \frac{1}{Z_W} (f(x - ct) - g(x + ct))$$

Dabei ist  $c = \frac{1}{\sqrt{L'C'}}$  die Ausbreitungsgeschwindigkeit und  $Z_W = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$  der Wellenwiderstand der Leitung. Bei einer verlustbehafteten Übertragungsleitung müssen die Gleichungen auch die Widerstands- und Leitfähigkeitsverluste berücksichtigen. Eine nähere Diskussion hierzu finden Sie in [1] und [2] oder einem der einschlägigen Fachbücher zur Elektrotechnik.

An den Leitungsenden sind die aus einer plötzlichen Spannungs- und Stromänderung resultierenden Wanderwellen als hochfrequente Impulse wahrnehmbar. Spezielle Algorithmen in den Schutzgeräten und Fehlerortungsgeräten nehmen eine Zeitstempelung der Ankunftszeiten der Wanderwellen vor. Aus den

gemessenen Verzögerungen der Ankunftszeiten lässt sich der Fehlerort einfach und mit einer hohen Genauigkeit von bis zu 300 m, was in etwa dem Abstand zwischen zwei Masten entspricht, berechnen.

Durch die Dispersion wird die Form der Wellen während ihrer Wanderung durch das Medium einer Stromleitung geringfügig abgeflacht. Dies muss bei der Zeitstempelung der Wellenankunft durch die Schutzgeräte berücksichtigt werden. Beim Auftreffen von Wanderwellen auf ein Leitungsende (oder einen Fehlerort) wird ein Teil der Welle transmittiert, ein Teil reflektiert und ein geringer Teil absorbiert. Im Fall der Reflexion wird wie in Abbildung 2 gezeigt die Polarität des Wanderwellenimpulses invertiert. Für Stromwanderwellen hängt die Polarität des Impulses natürlich auch davon ab, in welcher Richtung die Welle den Stromwandler passiert.

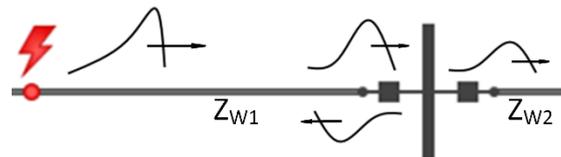


Abbildung 2: Aufteilung von Wanderwellen in transmittierte und reflektierte Wellen an Stoßstellen

Die Ausbreitung von Wanderwellen und deren Reflexionen wird gewöhnlich in Wellenfahrplänen dargestellt (Bewley Lattice-Diagramm, siehe Abbildung 3). Die Steigung der Ausbreitungslinien ist proportional zur Ausbreitungsgeschwindigkeit in den Leitungen. Für unterschiedliche Medien, also beispielsweise für Topologien, in denen Freileitungen und Kabel gemischt verwendet werden, können in ein und demselben Diagramm auch unterschiedliche Geschwindigkeiten dargestellt werden.

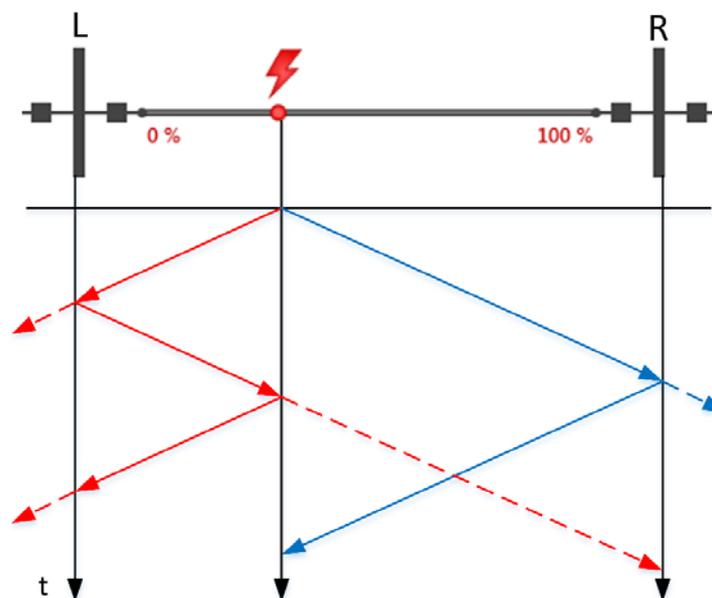


Abbildung 3: Der Wellenfahrplan zeigt die Ausbreitung von Wanderwellen im zeitlichen Verlauf

Bei komplizierteren Netztopologien, also beispielsweise bei Topologien mit mehreren Sammelschienen, benachbarten Leitungen und Parallelleitungen, müssen die Algorithmen der Geräte in der Lage sein, an unterschiedlichen Stoßstellen in der Topologie reflektierte Wanderwellen voneinander zu unterscheiden. Dies kann mitunter sehr heikel sein. Daher ist es in der Realität sehr schwierig, solche Entscheidungen zuverlässig zu treffen, da Reflexionen auch bereits durch geringe Veränderungen des Wellenwiderstandes verursacht werden können, sodass weniger robuste Algorithmen nur die erste erkannte Wanderwelle berücksichtigen. Beispielsweise ist es in dem in Abbildung 4 gezeigten Fall nicht einfach, eine vom Fehlerort auf der geschützten Leitung zurück zum lokalen Ende reflektierte Wanderwelle von einer auf der

vorhergehenden Leitung in Rückwärtsrichtung reflektierten Wanderwelle oder einer Reflexion vom entfernten Leitungsende zu unterscheiden.

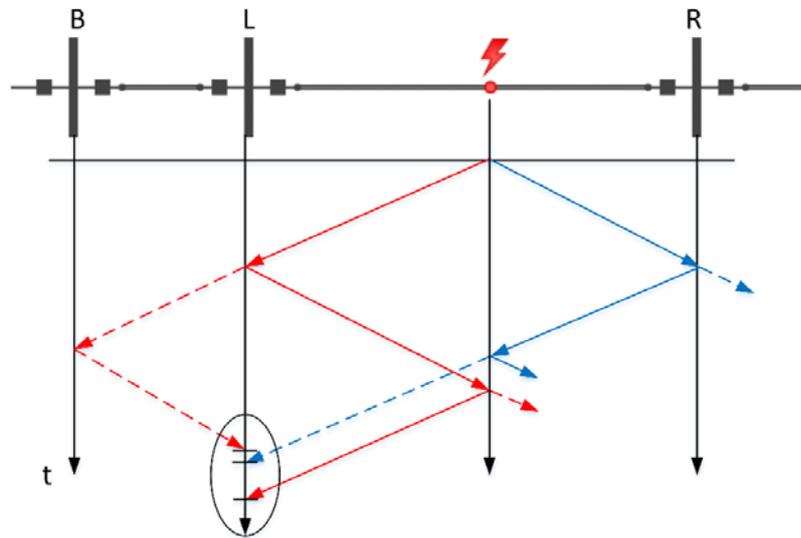


Abbildung 4: Herausforderungen bei der Unterscheidung von Wanderwellenreflexionen

Bei Sekundärgeräten kann die Erkennung von Wanderwellen an den Sekundäranschlüssen der Strom- und Spannungswandler stattfinden. Die gängigen Stromwandler bieten eine ausreichend große Bandbreite und erlauben so eine zuverlässige Erkennung der Wanderwellenimpulse an den Sekundärstrom-Eingängen der Geräte. Im Fall von Spannungswandlern ist eine Erkennung von Wanderwellenimpulsen auf der Sekundärseite erheblich schwieriger. Dies gilt insbesondere für kapazitiv gekoppelte Spannungswandler (CVT/CCVT), bei denen die hohen Frequenzen nur über die parasitären Kapazitäten übertragen werden. Daher basieren manche Funktionsprinzipien von Wanderwellenelementen ausschließlich auf Stromwanderwellen. Zukünftig könnte es jedoch neuartige Spannungs- und Stromsensoren geben, die eine weitaus größere Übertragungsdynamik für hochfrequente Signale bieten.

Auf der Auswertung von Wanderwellen basierende Schutz- und Fehlerortungselemente weisen gegenüber den auf Vektoren basierenden Elementen einige Vorteile auf. Da die Berechnung des Fehlerortes anhand der gemessenen Zeitdifferenzen zwischen den Ankunftszeitpunkten von Wanderwellenimpulsen erfolgt, ist eine sehr genaue Fehlerortung möglich. Im Fall von digitalen Anlagenkomponenten sind heutzutage präzise Zeitmessungen sehr einfach möglich, auch bei verteilt angeordneten Geräten, da diese über eine gemeinsame globale Zeitreferenz zeitsynchronisiert werden können.

Die Ausbreitung von Wanderwellen wird durch möglicherweise installierte Reihenkompensationen von langen Leitungen nicht beeinflusst, wogegen Reihenkompensationen für Elemente, die mit der Impedanz arbeiten, eine große Herausforderung darstellen. Wanderwellen treten auch nicht nur in Übertragungsleitungen für Wechselspannung auf. Das Prinzip der Wanderwellen lässt sich genauso für Hochspannungsgleichstromnetze anwenden, bei denen eine Fehlerortung auf Basis der Impedanz ja nicht möglich ist.

Da sich Wanderwellen mit annähernd Lichtgeschwindigkeit ausbreiten, liegt die Information über einen Fehler physikalisch schnellstmöglich an den Leitungsenden vor und kann sofort verarbeitet werden. Auf Vektoren basierende Elemente benötigen dagegen für zuverlässige Vektorwerte ein Datenfenster mit einer Länge von einer Periode der Netzfrequenz. Zukünftig werden also Schutzrelais auf Basis der Wanderwellenanalyse auslösen und somit äußerst kurze Auslösezeiten im Bereich von nur wenigen Millisekunden ermöglichen.

### Nutzung von Wanderwellen für die Fehlerortung

Was sich bereits seit Jahren etabliert hat und in diversen Geräten im Feld eingesetzt wird, ist die Nutzung von Wanderwellen für die präzise Fehlerortung auf Übertragungsleitungen. Sowohl bei Verwendung in

speziellen Geräten zur Fehlerortung als auch bei Verwendung als integrierte Funktion in Schutzrelais ermöglicht dies eine genauere Lokalisierung von Fehlern als die auf der Impedanz basierenden Verfahren.

Alle Algorithmen für die Fehlerlokalisierung, die auf dem Scheinwiderstand beim Blick in die betreffende Leitung beruhen, besitzen nur begrenzte Genauigkeit. Das liegt an den Messfehlern der Spannungs- und Stromvektoren. Zudem werden diese Algorithmen von einer Reihe von Faktoren beeinflusst, die nur schwer zu eliminieren sind.

Hierzu zählen beispielsweise die Fehlerimpedanz (Lichtbogenwiderstand), die Einspeisebedingungen am lokalen und am entfernten Ende der Leitung, Überlagerungen von Lastflüssen, die Erdungsbedingungen sowie mutuelle Kopplungen mit einer Parallelleitung. Außerdem sind diese Algorithmen abhängig von korrekten Einstellungen für die Leitungsimpedanzen (Mitsystem und Nullsystem), welche entweder korrekt berechnet oder durch eine primärseitige Messung der Leitungsimpedanz ermittelt werden müssen.

### Zweiseitige Fehlerortung mittels Wanderwellen

Die naheliegendste und robusteste Fehlerortung mittels Wanderwellen ist die zweiseitige Fehlerortung. Dieses Verfahren ist in Abbildung 5 gezeigt und in diversen Schutzgeräten und Fehlerortungsgeräten im Feld implementiert (Details siehe [3] und [4]).

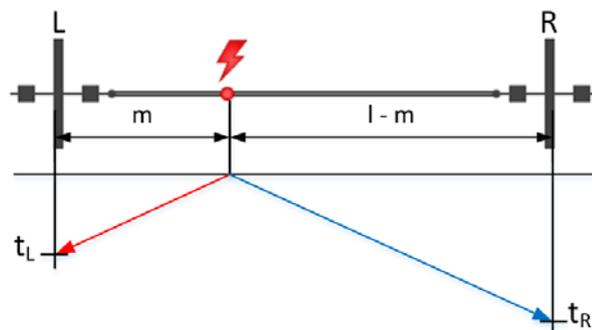


Abbildung 5: Zweiseitige Fehlerortung auf Basis der Zeitdifferenz des ersten Eintreffens der Wellen an den beiden Leitungsenden

Die Ankunftszeiten der Wanderwellen an den beiden Leitungsenden werden verglichen und daraus der Fehlerort  $m$  gemäß der nachfolgenden Formel berechnet:

$$m = \frac{1}{2}(l + (t_L - t_R)v)$$

Dabei ist  $l$  die Leitungslänge.  $t_L$  und  $t_R$  sind die Ankunftszeitpunkte der Wanderwelle am lokalen Ende bzw. am entfernten Ende.  $v$  ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit. Die Berechnung des Fehlerortes ist ausschließlich von den präzisen Zeitstempeln der Ankunftszeiten der Wanderwellenfronten und einer korrekten Längenangabe für die Übertragungsleitung abhängig. Eine präzise Zeitsynchronisation von Schutzgeräten und Geräten zur Fehlerortung ist heutzutage einfach möglich. Hierzu muss entweder auf beiden Seiten eine GPS-basierte Zeitreferenz vorhanden sein oder die Synchronisation erfolgt mittels einer netzwerkfähigen PTP Grandmaster Clock, welche die Zeitinformation mittels des IEEE 1588 PTP-Protokolls (Precision Time Protocol) im Ethernet-Netzwerk der Anlage verteilt.

Für eine Offline-Fehlerortung müssen zum Durchführen der Berechnung die Zeitstempel von beiden Enden eingeholt werden. Die unterschiedlichen Ankunftszeitpunkte der Wanderwellen können entweder manuell oder bei Verwendung eines Software-Tools automatisch in einem Wellenfahrplan zusammengestellt werden, um so den Fehlerort zu berechnen und zu verifizieren. Dieses Prinzip lässt sich auch auf Leitungstopologien mit drei oder mehr Enden ausweiten.

Für die Online-Fehlerortung wie sie in Schutzrelais implementiert ist, werden die Zeitstempel meist unter Verwendung von bereits bestehenden Kommunikationsverbindungen, welche parallel auch beispielsweise für den Leitungsdifferenzschutz verwendet werden, sofort an das entfernte Ende übertragen. Im

Schutzrelais kann die aus der Wanderwelle erhaltene Fehlerortungsinformation mit zusätzlichen Informationen aus einem auf der Impedanz basierenden Fehlerortungsalgorithmus ergänzt werden, sodass eine zuverlässige und präzise Aussage in den Störschrieb oder an die Leitwarte ausgegeben werden kann.

### Einseitige Fehlerortung mittels Wanderwellen

Die einseitige Fehlerortung mittels Wanderwellen erfordert für die Berechnung des Fehlerortes keine Informationen vom entfernten Leitungsende. Daher funktioniert die Online-Fehlerortung auch, wenn keine Kommunikationsverbindung zwischen den Geräten zur Verfügung steht. Die Berechnung des Fehlerortes basiert auf den Ankunftszeiten der ersten Wanderwelle und der ersten vom Fehler zurück reflektierten Welle. Dies ist in Abbildung 6 gezeigt.

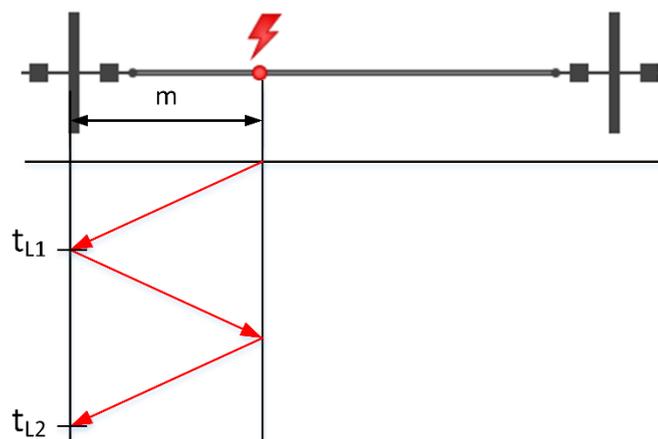


Abbildung 6: Einseitige Fehlerortung auf Basis der Differenz zwischen den Ankunftszeiten der ersten Wanderwelle und der ersten reflektierten Welle

Die Berechnung des Fehlerortes  $m$  kann anhand der nachfolgenden einfachen Formel erfolgen:

$$m = \frac{t_{L2} - t_{L1}}{2} v$$

Dabei ist  $t_{L1}$  die Ankunftszeit der ersten Wanderwelle und  $t_{L2}$  der Zeitstempel der ersten vom Fehler zurück reflektierten Welle.  $v$  ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit. Natürlich muss das Schutzgerät die vom Fehlerort reflektierte Welle von anderen Reflexionen, wie beispielsweise der Reflexion von einem hinter sich liegenden kurzen Leitungsabschnitt, wie er in Abbildung 3 gezeigt ist, unterscheiden können. Dies kann entweder anhand einer auf der Polarität der Strom- und Spannungswanderwellen beruhenden Richtungsinformation erfolgen oder anhand einer komplexeren Topologie-Information aus einer Erfassung der Wanderwellen während der Leitungsanschlusung (Details siehe [5]). Bei der einseitigen Fehlerortung benötigt die Berechnung keine genaue Längenangabe für die Leitung und enthält daher auch keine Fehler durch Längenschwankungen aufgrund des variierenden Durchhangs von Freileitungen.

### Herausforderungen bei der Prüfung und Inbetriebnahme von Wanderwellen-Elementen

Für die Prüfung und Inbetriebnahme von mit Wanderwellen arbeitenden Elementen ist es notwendig, die während bestimmter Netzereignisse (z.B. Fehler auf der geschützten Übertragungsleitung) auftretenden transienten Vorgänge zu simulieren oder zu reproduzieren. Da diese transienten Vorgänge sehr hochfrequente Signale beinhalten und zeitlich sehr präzise auftreten, muss die Prüfausstattung in der Lage sein, derartige Signale zu simulieren und an die zu prüfenden Geräte auszugeben.

Für die Offline-Simulation von Wanderwellenvorgängen am Computer gibt es zahlreiche Programme (z.B. Electro-Magnetic Transients Program EMTP), welche in der Lage sind, die Ausbreitung von Signalen auf Übertragungsleitungen zeitlich korrekt und mit so hohen Abtastraten zu simulieren, dass die relevanten

hochfrequenten Anteile ebenfalls enthalten sind. Allerdings ist es sehr anspruchsvoll, solche Simulationen durchzuführen und die erforderlichen Parameter so einzustellen, dass ein realitätsnahes Ergebnis erzielt wird. Darüber hinaus arbeiten die meisten dieser Programme mit unterschiedlichen Einstellungen und Simulationsalgorithmen, sodass es schwierig ist, zuverlässige und vergleichbare Ergebnisse zu erhalten.

Eine exakte Simulation bei derart hohen Abtastraten ist noch immer recht zeitaufwändig und erfordert bei längeren Simulationsdauern sehr viel Speicherplatz. In der Praxis können solche Simulationen daher nur für kurze Simulationsdauern zwischen einigen Millisekunden und 1 Sekunde sowie für einen einzelnen Wanderwellenvorgang durchgeführt werden.

Die Ergebnisse solcher Offline-Simulationen liegen dann in Form von zeitlich hoch aufgelösten Abtastsignalen für die Spannungen und Ströme beispielsweise im COMTRADE-Format vor. Diese können für die weitere Offline-Untersuchung und -Analyse verwendet werden. Bei der Entwicklung und im Labor können solche mit einer hohen Bandbreite vorliegenden Signale mit kleiner Leistung unter Umgehung der Strom- und Spannungswandler (siehe [6]) direkt in die analogen Signaleingänge der Schutz- und Fehlerortungsgeräte eingespeist werden.

Eine Einspeisung von solchen transienten Signalen in die Eingänge von konventionellen Strom- und Spannungswandlern ist jedoch heutzutage noch nicht möglich, da die Strom- und Spannungsverstärker der für die Schutzprüfung verfügbaren Prüfgeräte nur eine begrenzte Bandbreite aufweisen. Die Abtastung der Signale für die Wanderwellenelemente in den Schutzgeräten erfolgt mit Abtastraten von 1 MHz und mehr. Die Bandbreite der simulierten Signale muss also noch höher sein als diese Abtastrate. Die zur Erzeugung der stationären Signale für die 100 V- bzw. 1 A/5 A-Eingänge der im Betrieb an die Spannungs- und Stromwandler angeschlossenen Schutzgeräte verwendeten Verstärker haben jedoch nur eine Bandbreite im Bereich von einigen kHz.

## **Mögliche Lösungen**

Eine Möglichkeit für die Prüfung von Wanderwellenelementen in der Praxis ist die separate Simulation der hochfrequenten Wanderwellenimpulse. Mit Hilfe eines speziellen Prüfgerätes, welches in der Lage ist, die Wanderwellenimpulse für die Strom- und Spannungseingänge zeitlich sehr präzise zu erzeugen, können dann die Wanderwellenelemente der zu prüfenden Schutz- oder Fehlerortungsgeräte stimuliert und die korrekte Funktion der Zeitstempelung und der Fehlerortungsalgorithmen verifiziert werden.

Die Erzeugung von Wanderwellenimpulsen für Spannungseingänge unterscheidet sich geringfügig von der Erzeugung für Stromeingänge. Für Stromeingänge könnte dies beispielsweise ganz einfach durch Entladen eines zuvor geladenen Kondensators zum richtigen Zeitpunkt erfolgen. Die genaue Verschaltung und der Anschluss an die Eingänge des Schutzgerätes müssen allerdings sorgfältig konzipiert und entsprechend der Eingangsbürde der Geräteeingänge angepasst werden. Die Signalfanke muss dabei ausreichend steil sein, sodass das zu prüfende Gerät den Ankunftszeitpunkt exakt bestimmen kann.

Damit sich unterschiedliche Wanderwellenvorgänge simulieren lassen, müssen sowohl die Polarität als auch das Timing der Impulse exakt gesteuert werden können. Die Steuerung der Impulsamplitude ist dabei nicht ganz einfach, da diese von der Eingangsbürde und der Schaltung abhängig ist. Da die Impulsamplitude darüber hinaus auch noch durch viele andere Faktoren beeinflusst werden kann, können sich mit Wanderwellen arbeitende Geräte aber ohnehin nicht ausschließlich auf die absolute Amplitude der Wanderwellensignale stützen. Für komplexe Szenarien sind sogar mehrere in exakten Zeitabständen aufeinander folgende Impulse erforderlich, um Reflexionen von Wanderwellen zu simulieren.

Wenn ausschließlich die Wanderwellenfunktion geprüft werden soll, ist es bei einigen mit der Überwachung von Wanderwellensignalen arbeitenden Geräten ausreichend, nur die Wanderwellenimpulse einzuspeisen. Ein Signal mit Grundfrequenz bzw. mit geringer Bandbreite ist dann nicht erforderlich. Bei anderen Geräten kann zwar in den Einstellungen ein spezieller Modus konfiguriert werden, in dem nur Signale mit Wanderwellenimpulsen akzeptiert werden, allerdings wird es der Schutzingenieur vermeiden wollen, bei einem Gerät im Feld ausschließlich für Prüfzwecke die Geräteeinstellungen zu ändern. Bei den restlichen Geräten ist eine Einspeisung des Wanderwellenimpulses ohne ein Grundsignal überhaupt nicht möglich.

Ein weitaus besserer Ansatz ist es also, die Wanderwellenimpulse den für die Prüfung der konventionellen Schutzelemente verwendeten Strom- oder Spannungssignalen mit geringer Bandbreite zu überlagern. Hierfür wird neben der oben beschriebenen Einspeisung für die Wanderwellenimpulse ein herkömmliches Prüfgerät verwendet, welches in der Lage ist, Strom- und Spannungssignale in einem Frequenzbereich von der Grundfrequenz bis zu einigen kHz auszugeben. Für die Einspeisung der Stromsignale können beispielsweise die beiden Ausgänge einfach parallel an die Stromeingänge des zu prüfenden

Schutzgerätes angeschlossen werden. Für die Spannungseingänge des Schutzgerätes kann der Spannungspuls der Wanderwelle seriell zum Signal der Welle addiert werden.

Für die Simulation des Fehlerszenarios wird das Schutzprüfgerät durch eine auf einem PC laufende Prüfsoftware gesteuert. Diese errechnet mittels eines Netzwerksimulationsalgorithmus die transienten Signale für die Spannungen und Ströme mit einer Abtastrate von beispielsweise 10 kHz. In der Software ist die Netztopologie mit den Übertragungsleitungen, Sammelschienen und Einspeisungen modelliert. Für die Modellierung der Übertragungsleitung genügt ein einfaches konzentriertes RLC-Modell. Dies liefert ausreichend realistische Signale für den Fehlereintritt. Abbildung 7 zeigt die Signale für die Spannungen und Ströme in der auf dem PC laufenden Prüfsoftware.

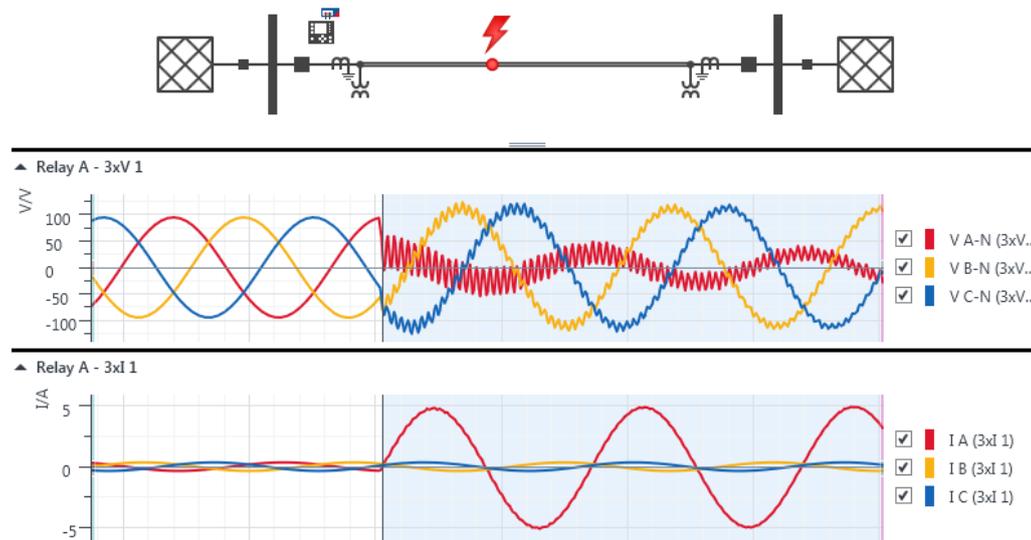


Abbildung 7: Netzwerksimulation für einen einzelnen Leiter-Erde-Fehler auf einer 100 km langen Übertragungsleitung mittels eines konzentrierten RLC-Modells

Die Ausbreitung von Wanderwellen wird anhand eines separaten Algorithmus ermittelt. Für die Übertragungsleitungen sind die Leitungslänge und die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wanderwellen bekannt. Daraus können die exakten Ankunftszeiten der Wanderwellenimpulse an den Leitungsenden, wo die Schutzgeräte angeschlossen sind, berechnet werden. Es wird dieselbe Modellierung der Topologie verwendet, wie für die vorherige Netzwerksimulation. Der hinter den Wellenfahrplänen stehende Gedanke kann weiterentwickelt werden in eine Darstellung mit Knoten (Sammelschienen) und Verbindungsleitungen, aus der ein Algorithmus auf einfache Weise die Ausbreitung von Wanderwellen von jedem beliebigen Punkt in der Topologie aus hin zu den verschiedenen Relaisstandorten ermitteln kann, einschließlich der durch Stoßstellen verursachten Reflexionen und Polaritätsänderungen.

Um ein solches Prüfzenario einzuspeisen, muss die Prüfausstattung sowohl die Ausgabe der Abtastwerte des Grundsignals mit geringer Bandbreite als auch die überlagerten Wanderwellenimpulse zeitlich präzise steuern. Die Wanderwellenimpulse müssen dabei mit dem Fehlereintrittszeitpunkt der konventionellen Signale koordiniert werden. Hierfür benötigt man ein Prüfgerät, bei dem die Signalerzeugung durch eine hochpräzise interne Zeitreferenz synchronisiert wird und die Triggerung der Wanderwellenimpulse durch dieselbe Zeitreferenz mit einer Präzision im Bereich von Nanosekunden gesteuert werden kann. Eine Lösung, bei der die Triggerung der Wanderwellenimpulse durch ein externes Binärsignal erfolgt, würde zusätzliche Zeitfehler mit sich bringen, die bei der genannten Lösung vermieden werden.

Bei Geräten, die auf dem Prinzip der zweiseitigen Fehlerortung arbeiten, muss natürlich die Einspeisung an beiden Enden gleichzeitig erfolgen und die beiden Enden müssen exakt zeitsynchronisiert sein. Wie in [7] und [8] detailliert beschrieben, kann beispielsweise ein Aufbau wie in Abbildung 8 gezeigt verwendet werden.

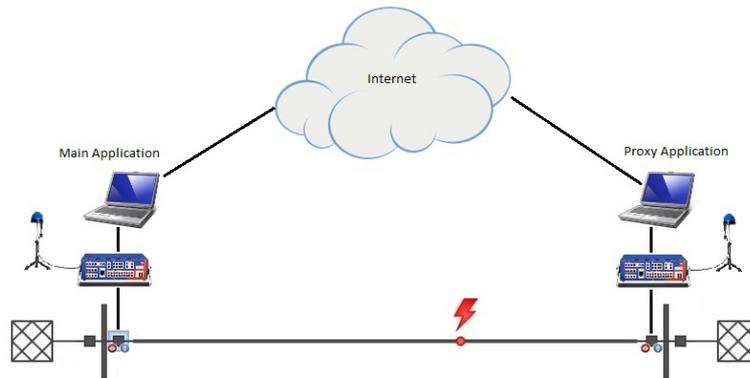


Abbildung 8: Aufbau für eine End-to-End-Prüfung mittels verteilt angeordneter und via GPS synchronisierter Prüfgeräte

Sind die Schutzprüfgeräte verteilt, also an beiden Enden der Leitung angeordnet, erfolgt die Zeitsynchronisation der Prüfgeräte mit Hilfe einer GPS-basierten Zeitreferenz, welche den Prüfgeräten die Zeitinformation über das IEEE 1588 PTP-Protokoll bereitstellt. Die so erzielte Zeitgenauigkeit liegt im zweistelligen Nanosekundenbereich. Beide Prüfgeräte werden von einem Leitungsende aus gemeinsam durch eine PC-Software gesteuert. Diese nimmt auch sämtliche Berechnungen für die transienten Signale und die simulierten Wanderwellen vor. Die Software steuert die an den beiden Leitungsenden positionierten Prüfgeräte entweder über eine direkte Netzwerkverbindung zur entfernten Anlage oder über die Internet Cloud.

Sowohl die Einspeisung der transienten Signale für Ströme und Spannungen bei Abtastraten von 10 kHz als auch die in Bezug auf den Fehlereintritt getakteten Wanderwellenimpulse verwenden dieselbe Zeitreferenz. Der in einem solchen verteilten Aufbau auftretende Jitter der Wanderwellenimpulse kann auch über einen längeren Zeitraum hinweg im unteren zweistelligen Nanosekundenbereich gehalten werden (siehe Abbildung 9).

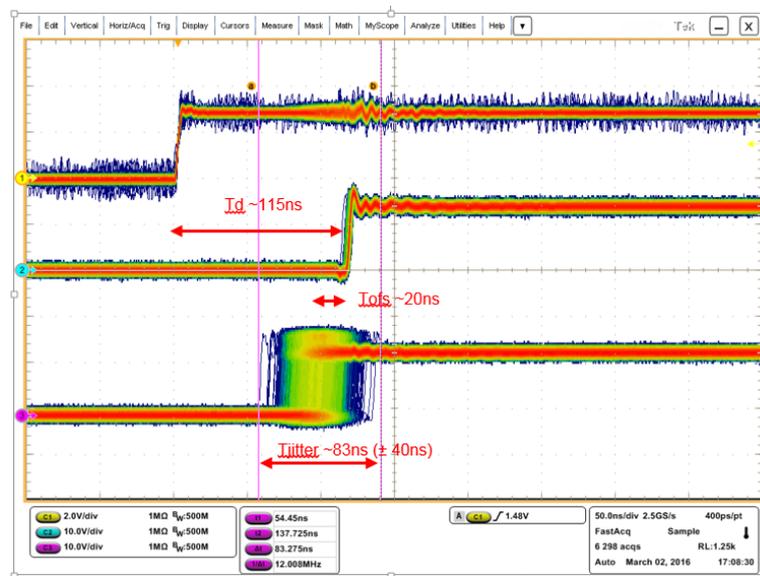


Abbildung 9: Jitter der Wanderwellenimpulse für zwei verteilt angeordnete zeitsynchronisierte Prüfgeräte

Mit diesem Prüfkonzept konnten in einem End-to-End-Prüfszenario erfolgreich Prüfungen von Leitungsdifferenzialschutzrelais mit auf Stromwanderwellen beruhender zweiseitiger Fehlerortungsfunktion durchgeführt werden. Es wurden Fehler an unterschiedlichen Orten auf der geschützten Leitung in einem Bereich von 0 bis 100 % der Leitungslänge simuliert. Die Relais errechneten den Fehlerort dabei sehr präzise mit einem Fehler von nur 10 bis 30 m. Parallel hierzu fand in den Relais eine auf der Impedanz

basierende Fehlerortung statt. Diese zeigte ebenfalls entsprechende Werte, allerdings natürlich nicht immer mit derselben Genauigkeit. Alle Prüfungen wurden mit genau denselben Relaiseinstellungen vorgenommen, welche den Einstellungen im realen Betrieb der Relais in einer Anlage entsprachen.

## Ausblick

Derzeit verwenden die meisten in Schaltanlagen verbauten Schutz- und Fehlerortungsgeräte Wanderwellenelemente ausschließlich für die Fehlerortung. Bei der Neuentwicklung von Schutzrelais wird sicher der Vorteil zum Tragen kommen, dass Wanderwellen sich mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegen, was einen Leitungsschutz mit Auslösezeiten von nur wenigen Millisekunden ermöglicht. Das bisherig relativ lange Datenfenster, das für eine zuverlässige Berechnung von Vektoren erforderliche war, wird dann der Vergangenheit angehören.

Für eine zuverlässige Auslöseentscheidung im Schutzrelais muss natürlich die auf der Wanderwelle basierende Information über den Fehlerort nicht nur schnell, sondern auch verlässlich verfügbar sein. Das Relais muss Fehler auf der geschützten Leitung von Fehlern außerhalb des Schutzbereiches unterscheiden, also beispielsweise von auf der vorhergehenden Leitung in Rückwärtsrichtung stattfindenden Fehlern, von hinter dem Relais am entfernten Ende stattfindenden Fehlern auf der nachfolgenden Leitung oder von einem Fehler auf der Parallelleitung, wie in Abbildung 10 gezeigt.

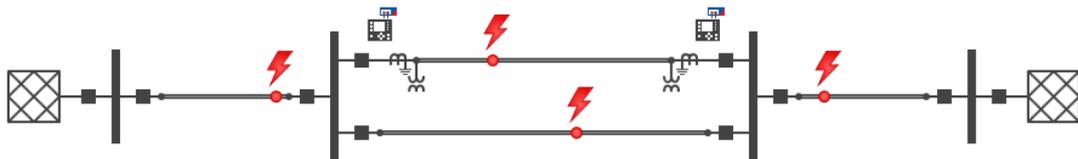


Abbildung 10: Verschiedene Arten von Fehlern, die ein Schutzrelais unterscheiden muss

Um eine zuverlässige Funktion von mit Wanderwellenelementen arbeitenden Schutzrelais zu erreichen, arbeiten meist weitere Elemente parallel dazu und unterstützen so die Auslöseentscheidung mit entsprechenden ergänzenden Informationen. Relaiselemente, die mit dem sogenannten Incremental Quantities-Verfahren arbeiten, eignen sich sehr gut für die Verwendung in Verbindung mit Wanderwellenelementen, da diese ebenfalls im Zeitbereich arbeiten und Fehlerinformationen sehr schnell bereitstellen können.

Da Kommunikationsverbindungen zwischen im Netz verteilt angeordneten Relais heute einfach verfügbar sind, kann der Leitungsschutz durch Nutzung von Informationen von beiden Leitungsenden weiter verbessert werden. End-to-End-Schutzsysteme und Leitungsdifferenzialschutzsysteme können die schnell verfügbare Information von den Wanderwellenelementen weiter ergänzen und so durch Nutzung der schnellen Kommunikationsverbindungen zwischen zwei Schutzgeräten die Zuverlässigkeit der Auslöseentscheidung erhöhen, wengleich die Kommunikationsverbindung natürlich eine zusätzliche Verzögerung einbringt, welche mindestens die Laufzeit auf der geschützten Leitung beträgt. Die neuesten Entwicklungen bei der Realisierung von im Zeitbereich und mit Wanderwellenelementen arbeitenden Leitungsschutzrelais finden Sie in [9] und [10].

Die Inbetriebnahme und Prüfung der Geräte in den Anlagen ist für Schutzgeräte, welche die Ausschaltung von Leistungsschaltern hervorrufen, weitaus wichtiger als für Geräte, die ausschließlich Informationen zum Fehlerort liefern. Eine umfassende Prüfung, die sämtliche Relaiselemente beinhaltet, ist zwingend erforderlich und sollte im Feld für die in der Anlage installierten Geräte durchgeführt werden. Wenn ein Schutzsystem die Kommunikationsverbindungen zwischen den Anlagen nutzt, ist darüber hinaus auch eine End-to-End-Prüfung mit verteilt angeordneten Prüfgeräten erforderlich.

Schutzprüflösungen, wie die zuvor beschriebenen Wanderwellenelemente, sind eine weitere Entwicklung in Richtung integrierter Lösungen für die Prüfung neuer Schutzrelais - unabhängig mit welcher Art von Zeitbereichselementen diese arbeiten. Die Möglichkeit, mehrere der in den Relais zusammenarbeitenden Relaiselemente parallel mit den eingespeisten Größen so genau stimulieren zu können, dass verifiziert werden kann, ob die Algorithmen wie erwartet arbeiten und das Relais korrekt

eingestellt ist, wird dem Schutzingenieur eine komfortable und bequeme Inbetriebnahme und Prüfung ermöglichen.

## Fazit

Eine Prüfung und Inbetriebnahme der Wanderwellenelemente in modernen Schutzgeräten und Geräten zur Fehlerortung ist mit herkömmlichen Schutzprüfgeräten nicht möglich. Das Überlagern von zeitlich präzise gesteuerten Wanderwellenimpulsen mit dem eingespeisten Strom- bzw. Spannungssignal mit geringer Bandbreite ermöglicht eine integrierte Prüfung des zu prüfenden Gerätes, welche in der Lage ist, sämtliche Relaiselemente gleichzeitig abzudecken und darüber hinaus keine speziellen Prüfanschlüsse oder Prüfeinstellungen am Relais erfordert.

Bei Verwendung von mehreren, verteilt im Netz angeordneten und zeitsynchronisierten Prüfgeräten ist auch eine komplette Prüfung von ganzen Schutzsystemen möglich. Eine solche Prüfung ist zwingend notwendig, da die meisten in Leitungsschutzsystemen verwendeten Wanderwellenelemente über eine schnelle Kommunikationsverbindung zur Verfügung stehende Informationen von beiden Leitungsenden nutzen.

Wanderwellenelemente und andere auf der Analyse im Zeitbereich beruhende Elemente ermöglichen neue Schutzrelais, die wesentlich schneller auslösen können als jedes auf der Vektoranalyse basierende Element. Für die Prüfung und Inbetriebnahme solcher Geräte werden neue Prüfgeräte und neue Konzepte für integrierte Prüfungen erforderlich sein.

Weiterführende Informationen zu diesem Thema zeigt auch unser neuestes Video mit dem Titel [„Field Testing Travelling Wave Protection System“](#)

## Verweise

- [1] L. V. Bewley, "Traveling Waves on Transmission Systems", General Electric Company, Pittsfield, MA, 1933
- [2] A. Greenwood, "Electrical Transients in Power Systems", 2nd ed., John Wiley & Sons, 1991
- [3] E. O. Schweitzer, III, A. Guzmán, M. V. Mynam, V. Skendzic, B. Kasztenny und S. Marx, "Locating Faults by the Traveling Waves They Launch", 40. Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, 2013
- [4] E. O. Schweitzer, III, A. Guzmán, M. V. Mynam, V. Skendzic, B. Kasztenny und S. Marx, "A New Traveling Wave Fault Locating Algorithm for Line Current Differential Relays", 12. International Conference on Developments in Power System Protection, Kopenhagen, Dänemark, 2014
- [5] E. O. Schweitzer, III, A. Guzmán, M. V. Mynam, V. Skendzic, B. Kasztenny, C. Gallacher und S. Marx, "Accurate Single-End Fault Location and Line-Length Estimation Using Traveling Waves", 13. International Conference on Developments in Power System Protection, Edinburgh, UK, 2016
- [6] S. Marx, B. K. Johnson, A. Guzmán, V. Skendzic und M. V. Mynam, "Traveling Wave Fault Location in Protective Relays: Design, Testing, and Results", 16. Annual Georgia Tech Fault and Disturbance Analysis Conference, Atlanta, GA, 2013
- [7] B. Bastigkeit, C. Pritchard, T. Hensler, "New Possibilities in Field Testing of Distributed Protection Systems", PACWorld Conference, Zagreb, Kroatien, 2014
- [8] T. Hensler, C. Pritchard, F. Fink, "New Possibilities for Protection Testing using Dynamic Simulations in the Field", MATPOST Conference, Lyon, Frankreich, 2015
- [9] E. O. Schweitzer, III, B. Kasztenny, A. Guzmán, V. Skendzic und M. V. Mynam, "Speed of Line Protection – Can We Break Free of Phasor Limitations?", 41. Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, 2014

- [10] E. O. Schweitzer, III, B. Kasztenny, A. Guzmán, V. Skendzic und M. V. Mynam, "Performance of Time-Domain Line Protection Elements on Real-World Faults", 42. Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, 2015

## Über die Autoren



Dipl.-Ing. (FH) Christopher **Pritchard** wurde 1982 in Dortmund geboren. Er erhielt 2006 sein Diplom in Elektrotechnik an der FH Dortmund. Noch im gleichen Jahr ging er zu OMICRON electronics, wo er in der Entwicklung von Anwendungssoftware für Prüflösungen für Schutz- und Messsysteme arbeitete.

[christopher.pritchard@omicronenergy.com](mailto:christopher.pritchard@omicronenergy.com)



Dipl.-Ing. Heinz **Lampl** wurde 1962 in Graz geboren. Er erhielt 1986 sein Masterdiplom in Elektrotechnik an der Technischen Universität in Wien. 1990 ging er zu OMICRON electronics und arbeitete dort in der Hardware-Entwicklung für Prüfgeräte von Netzschutzgeräten.

[heinz.lampl@omicronenergy.com](mailto:heinz.lampl@omicronenergy.com)



Dipl.-Ing. Thomas **Hensler** wurde 1968 in Feldkirch geboren. Er erhielt 1995 sein Masterdiplom in Computerwissenschaften an der Technischen Universität in Wien. Noch im gleichen Jahr ging er zu OMICRON electronics, wo er in der Entwicklung von Anwendungssoftware für Prüflösungen für Schutz- und Messsysteme arbeitete. Er ist außerdem zuständig für das Produktmanagement für Anwendungssoftware im Bereich der Schutzprüfung.

[thomas.hensler@omicronenergy.com](mailto:thomas.hensler@omicronenergy.com)